

Exploration de l'écoulement dans un échangeur de chaleur tubulaire par vélocimétrie par images de particules

Th. M. Faure^{* **}, F. Lusseyran^{*}, P. Gougat^{*} et F. Launay[†]

^{*}Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur,
Unité Propre de Recherche 3251, Centre National de la Recherche Scientifique
B.P. 133, 91403 Orsay Cedex, France

^{**}Université Pierre et Marie Curie, Paris 6,
4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

[†] Institut de Physique Nucléaire d'Orsay,
Unité Mixte de Recherche 8608, Centre National de la Recherche Scientifique
15 rue Georges Clémenceau, 91406 Orsay Cedex, France

Résumé

L'étude du champ de vitesse à l'intérieur d'une maquette d'échangeur de chaleur en eau à l'échelle 1 est réalisée par vélocimétrie par images de particules. La géométrie tridimensionnelle de l'installation, ses faibles dimensions et la nature fortement instationnaire de l'écoulement imposent le choix de ce moyen de mesure. Un filtrage est appliqué aux images enregistrées, avant traitement par un algorithme de flot optique utilisant une programmation dynamique. Les déformations dues à la présence de dioptres optiques sont corrigées. Les mesures mettent en évidence de fortes variations de débit à travers les différents tubes de l'échangeur et un caractère non établi de l'écoulement. L'analyse des champs turbulents confirme ce comportement.

1. Introduction

Les écoulements à l'intérieur des échangeurs thermiques sont souvent complexes de part la géométrie considérée, et difficiles à explorer par des moyens métrologiques usuels. L'objectif de cette étude est de déterminer le champ de vitesse dans chacun des six canaux parallèles d'un échangeur de chaleur inclus dans une structure d'accélérateur linéaire de protons. Les conduits d'entrée et de sortie de cet échangeur n'étant pas contenus dans le plan des canaux, il en résulte un écoulement fortement complexe. La principale difficulté réside dans les faibles dimensions de l'installation, le diamètre intérieur de chacun des tubes étant de 4 mm, ce qui ne permet pas l'utilisation de moyens de mesures traditionnels. La vélocimétrie par images de particules (PIV) couplée à un algorithme avancé constitue une bonne alternative et permet d'accéder aux évolutions instantanées du champ de vitesse et à leurs moyennes et variances. Le traitement utilisé dans le cadre de cette étude est le flot optique par programmation dynamique, qui permet d'obtenir des champs de vitesses continus et très denses (un vecteur vitesse par pixel d'image) et qui s'avère particulièrement adapté dans les zones de forts gradients et pour les images de rapport de forme très grand. Une technique de filtrage de celles-ci, qui consiste à éliminer toutes les réflexions lumineuses parasites, a été mise en œuvre et permet de ne conserver que les images des traceurs de l'écoulement. Par ailleurs la présence d'un double dioptre peut être corrigée directement à partir du chemin optique des faisceaux lumineux et ne nécessite pas la présence d'une cuve à eau. L'analyse des résultats met en évidence une grande dispersion des vitesses entre les différents canaux de l'échangeur.

2. Dispositif expérimental

2.1 Le banc hydraulique

Le banc d'essais est constitué d'un circuit en eau permettant l'alimentation de la maquette de l'échangeur de chaleur (figure 1). Une pompe radiale à un étage de vitesse de rotation de 2850 tr.min⁻¹ permet la circulation du fluide à

travers le circuit fermé. Elle est alimentée par un réservoir de 30 l rempli d'eau déminéralisée qui est relié par un by-pass à la sortie de la pompe. En aval de celle-ci, se trouve une vanne de réglage et deux débitmètres qui permettent la mesure du débit d'entrée. L'écoulement traverse ensuite la maquette d'essais avant de revenir dans le réservoir d'alimentation. L'ensemencement est réalisé à l'aide de sphères creuses de verre de 10 μm de diamètre recouvertes d'une couche d'argent et de masse volumique 1400 kg.m^{-3} .

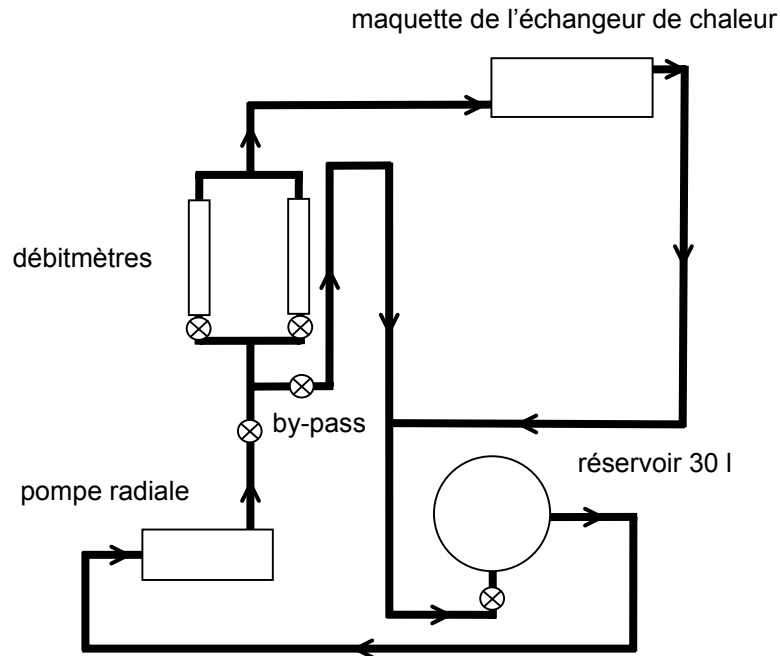


Fig. 1 Schéma du banc hydraulique

2.2 La maquette de l'échangeur de chaleur

Une maquette à l'échelle 1 de l'échangeur de chaleur est réalisée en aluminium et en verre, ce dernier matériau permettant un accès optique aisé aux différents tubes (figure 2). La conduite d'entrée a un diamètre de 8 mm et permet l'alimentation des 6 tubes parallèles par l'intermédiaire d'un collecteur. Chaque tube en verre a un diamètre intérieur de 4 mm. L'entrée s'effectue dans le collecteur situé en face du tube numéro 2 et la sortie, après la traversée d'un second collecteur, en face du tube numéro 5, ces conduites d'entrée et de sortie forment respectivement des angles de 25° et 155° par rapport au plan qui contient tous les tubes. Un tube isolé (à droite, figure 2) de mêmes caractéristiques que les autres est monté sur le même support pour permettre la validation de la technique de mesure sur un écoulement établi en conduite. Un tube supplémentaire (à gauche, figure 2) contient la mire de calibration du système de prise de vues et sert à déterminer le grandissement des images.

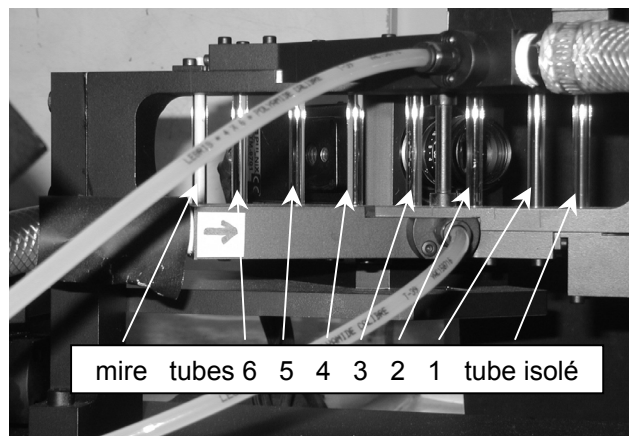


Fig. 2 Vue de la maquette de l'échangeur de chaleur

2.3 Le système d'éclairage et de prise de vues

L'éclairage est réalisé avec un laser Yag Quantel Twins Ultra, constitué de deux sources qui émettent chacune un flash lumineux de longueur d'onde 532 nm et d'énergie 30 mJ par impulsion. Chaque impulsion a une durée de 6 ns. Une lentille cylindrique située en sortie de la tête d'émission laser génère un plan lumineux qui est dirigé en direction de la zone d'étude au moyen d'un miroir plan. Le système de prise de vues consiste en une caméra 8 bits de 768x484 pixels. La synchronisation entre l'émission laser et la caméra est réalisée à l'aide d'un boîtier à impulsions et d'un module de synchronisation Quantel DPS 01 qui permet de faire varier le retard entre deux impulsions. L'ensemble de la tête d'émission laser et de la caméra est monté sur un chariot de déplacement pour permettre l'exploration successive de chacun des tubes de la maquette. La précision du déplacement axial est de 1 μm . La nappe d'éclairage laser est ainsi positionnée successivement sur la génératrice de chacun des tubes. Le réglage précis de la position de la nappe lumineuse s'obtient lorsqu'il n'y a pas de déviation de la tranche lumineuse lors de la traversée du tube selon sa hauteur.

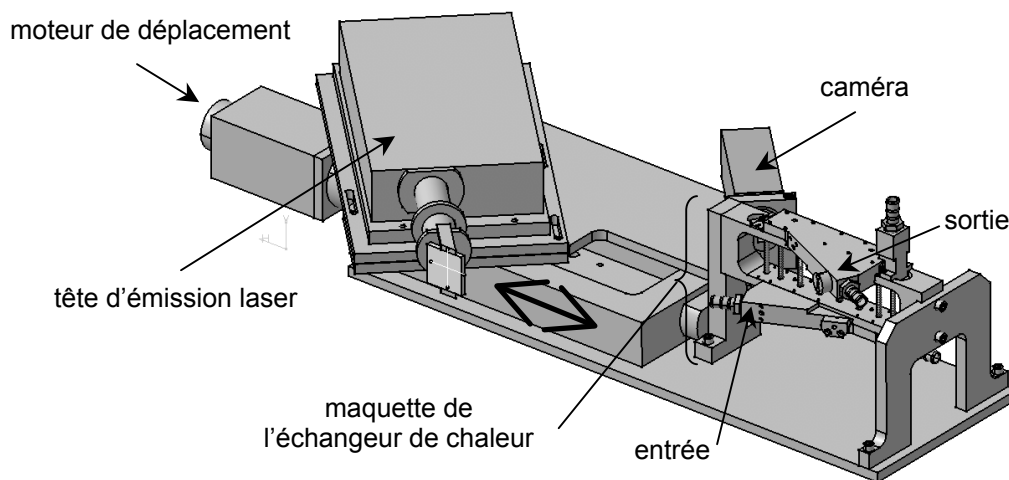


Fig. 3 Montage du système d'éclairage laser et de la caméra sur le chariot de déplacement

3. Traitement des images

3.1 Flot optique par programmation dynamique

La méthode utilisée pour le calcul des déplacements est le flot optique par programmation dynamique (Quénou 1998). Elle est basée sur la minimisation de la norme L^p de Minkowski entre deux images successives. Un découpage de l'image en bandes de plus en plus fines permet de calculer le champ de déplacements par itérations orthogonales. L'avantage de cette technique par rapport aux autres méthodes de calcul de PIV est qu'elle fournit des champs de vitesse continus et une densité d'information d'un vecteur par pixel. Les mesures sont réalisées avec un déplacement moyen entre deux images d'une dizaine de pixels. Pour ce faire, l'intervalle de temps entre les deux éclairagements est ajusté en fonction de la vitesse débitante dans le tube, et varie de 84 à 422 μs . Avec ces paramètres expérimentaux, l'incertitude de mesure est de $1/32^{\circ}$ de pixel qui se traduit par une erreur relative sur la vitesse de 0,31%.

3.2 Filtrage des images

Une méthode simple de filtrage des images a été mise en place dans le cadre de cette étude. Après un réglage précis du système d'émission laser et l'élimination attentive de tous les reflets parasites, on observe la persistance de réflexions lumineuses, sources de bruit susceptibles d'altérer le traitement PIV (figure 4 à gauche). Pour éliminer toute source de bruit lumineux, il paraît facile de soustraire à une image avec écoulement, une image prise sans écoulement où ne seraient présentes que les réflexions parasites. Cependant, une telle image est impossible à obtenir directement, car la présence des traceurs dans la nappe laser modifie le niveau d'intensité lumineuse réfléchi en bruit de fond. Une solution consiste à faire la moyenne de toutes les images enregistrées avec les particules qui sont statistiquement équiréparties dans le champ de mesure. Cette image moyenne conserve les réflexions parasites. Mais cette procédure implique le calcul d'un bruit de fond moyen faussé par la moyenne des particules. De plus cette moyenne est affectée par les variations d'intensité des sources au cours du temps. Le filtrage réalisé par cette

méthode est présentée sur la figure 4, au centre. Afin de s'affranchir des différences d'intensité lumineuse entre chacune des deux sources et au cours du temps, nous avons choisi de filtrer les images en soustrayant à chaque image numéro n , l'image issue du même éclairage qui la suit immédiatement numéro $n+2$ (figure 4, à droite). On remarque qu'aucune particule visible sur l'image brute n'est rejetée par ce traitement. Le résidu de ce filtrage peut être évalué en calculant la fonction d'intercorrélation des images. On observe clairement le pic de déplacement moyen noyé dans le bruit (figure 5, à gauche) dans le cas où aucun filtrage n'est appliqué, tandis que ce pic émerge très nettement (figure 5, au centre et à droite), dans le cas des images filtrées. La figure 6 quantifie l'amélioration apportée par ce traitement sur l'histogramme des trois images (à gauche) et sur la coupe de l'intercorrélation en $\Delta y = 0$ (à droite). On observe en particulier un pic secondaire en $\Delta x = 0$ sur l'intercorrélation de l'image non filtrée qui est totalement absent pour l'un ou l'autre des filtrages. La seule différence sensible entre les deux filtrages est la persistance des réflexions à la paroi du tube (figure 6 à gauche, cercles) pour le filtrage sur l'image moyenne, qui émerge d'un facteur 2 par rapport à la seconde méthode de filtrage.

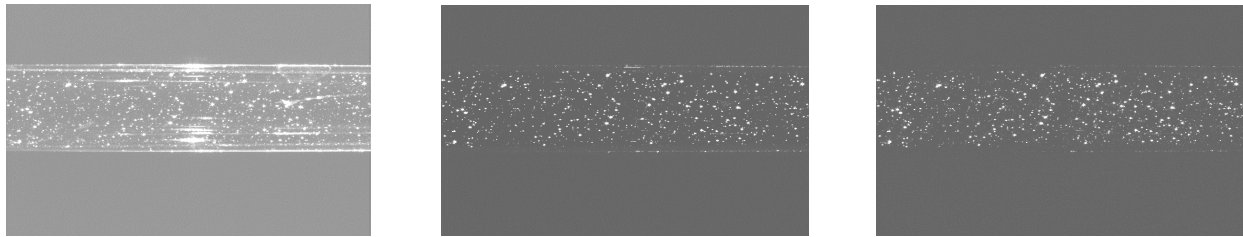


Fig. 4 Comparaison entre une image brute (à gauche), une image avec soustraction du bruit de fond moyen (au centre) et une image avec soustraction des images n et $n+2$ (à droite)

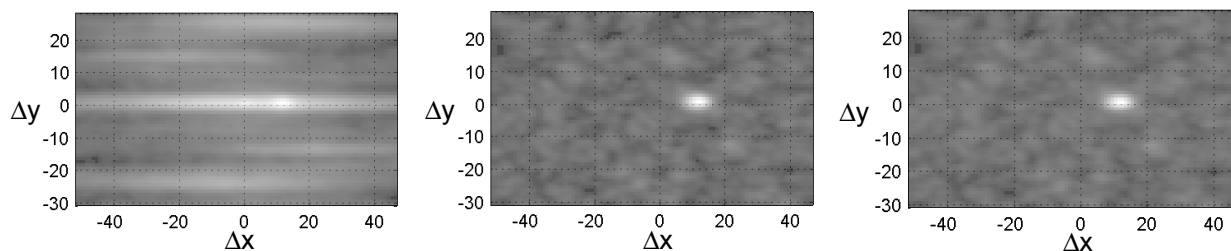


Fig. 5 Comparaison entre l'intercorrélation d'une paire d'images brutes (à gauche), avec soustraction du bruit de fond moyen (au centre) et avec soustraction des images n et $n+2$ (à droite)

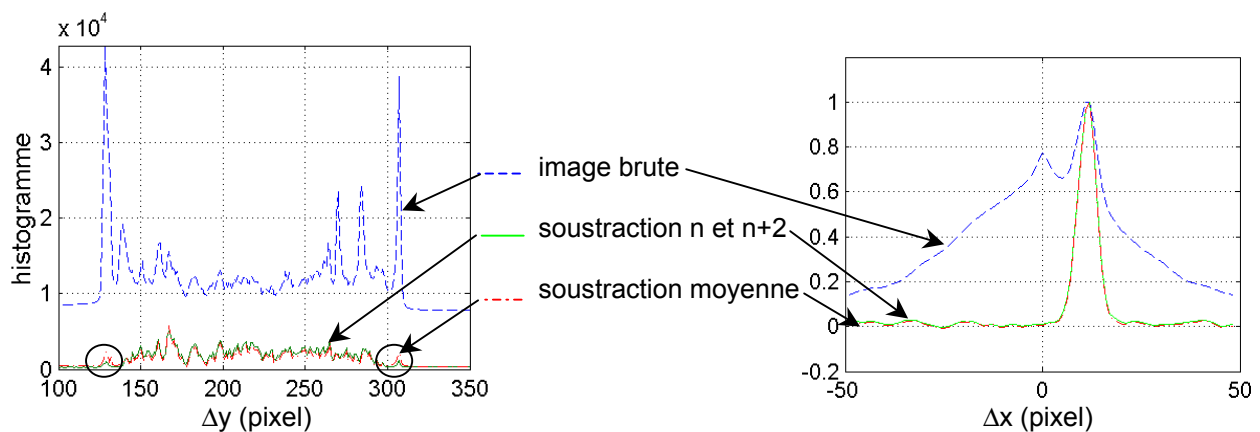


Fig. 6 Histogramme de l'image brute, avec soustraction du bruit de fond moyen et avec soustraction des images n et $n+2$ (à gauche) et intercorrélation en $\Delta y = 0$ pour une paire de ces mêmes images (à droite)

3.3 Correction des déformations optiques

La présence de deux dioptries optiques successifs, entre l'air et le verre des tubes, puis entre le verre et l'écoulement d'eau, engendre des réfractions lumineuses et par conséquent une déformation de l'image de la nappe laser à l'intérieur du tube et des déplacements des particules (figure 7). Une distance r dans le plan de visualisation sera donc observée comme étant une distance apparente r_a dans le plan de l'image de la caméra, suite aux réfractions angulaires $\alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$.

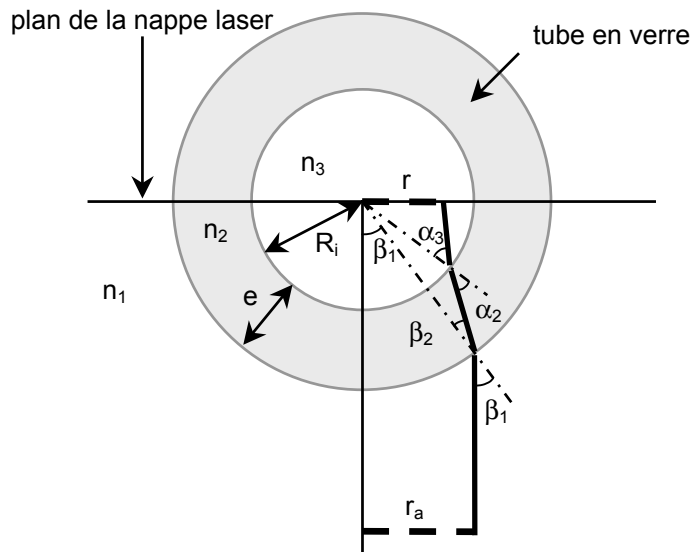


Fig. 7 Effet du double dioptre du tube sur l'image de la nappe laser

La relation entre ces deux distances s'obtient en résolvant :

- la relation de Snell-Descartes à l'interface entre chaque milieu :

$$n_1 \sin \beta_1 = n_2 \sin \beta_2 \quad (1)$$

$$n_2 \sin \alpha_2 = n_3 \sin \alpha_3 \quad (2)$$

- les relations d'optique géométrique :

$$(R_i + e) \sin \beta_1 = r_a \quad (3)$$

$$R_i \sin(\beta_1 - \beta_2 + \alpha_2) + [(R_i + e) \cos \beta_1 - R_i \cos(\beta_1 - \beta_2 + \alpha_2)] \tan(\beta_1 - \beta_2) = r_a \quad (4)$$

$$R_i \sin(\beta_1 - \beta_2 + \alpha_2) = r + R_i \cos(\beta_1 - \beta_2 + \alpha_2) \tan(\beta_1 - \beta_2 + \alpha_2 - \alpha_3) \quad (5)$$

avec les valeurs des indices de réfraction : pour l'air $n_1 = 1$ pour le verre $n_2 = 1,5$ pour l'eau $n_3 = \frac{3}{4}$ et les dimensions du rayon intérieur du tube $R_i = 2$ mm et son épaisseur $e = 1$ mm. La résolution des équations (1) à (5) conduit à l'évolution du rayon apparent r_a en fonction du rayon réel r représentée sur la figure 8. Cette correction est prise en compte pour les positions radiales ainsi que pour les déplacements mesurés avant le calcul des vitesses.

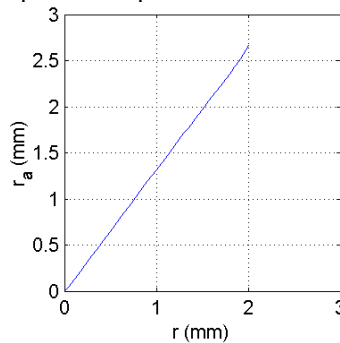


Fig. 8 Evolution du rayon apparent en fonction de la distance radiale réelle

4. Résultats et analyse

L'écoulement à l'intérieur de l'échangeur est étudié pour des débits variant entre 3 l.min^{-1} et 15 l.min^{-1} ce qui correspond à des nombres de Reynolds en entrée variant entre 7960 et 39760. L'ensemble des résultats correspond à l'acquisition de 600 images qui donnent 300 champs PIV instantanés pour chaque tube.

4.1 Champ moyen

Une moyenne de ces réalisations instantanées fournit le champ moyen à l'intérieur de chacun des six tubes.

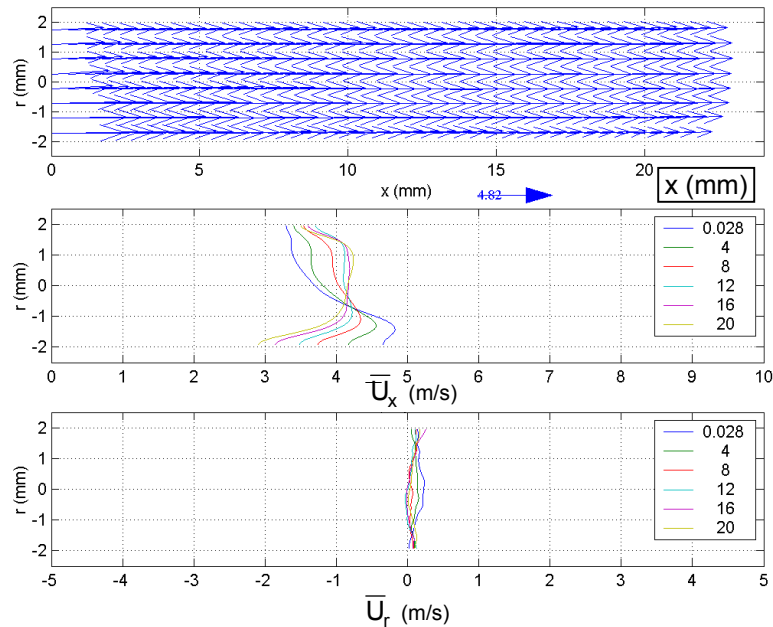


Fig. 9 Champ de vitesse moyen (1 vecteur sur 20), évolutions radiales de la vitesse axiale et de la vitesse radiale pour 6 positions axiales, dans le tube numéro 2 pour un débit d'entrée de $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

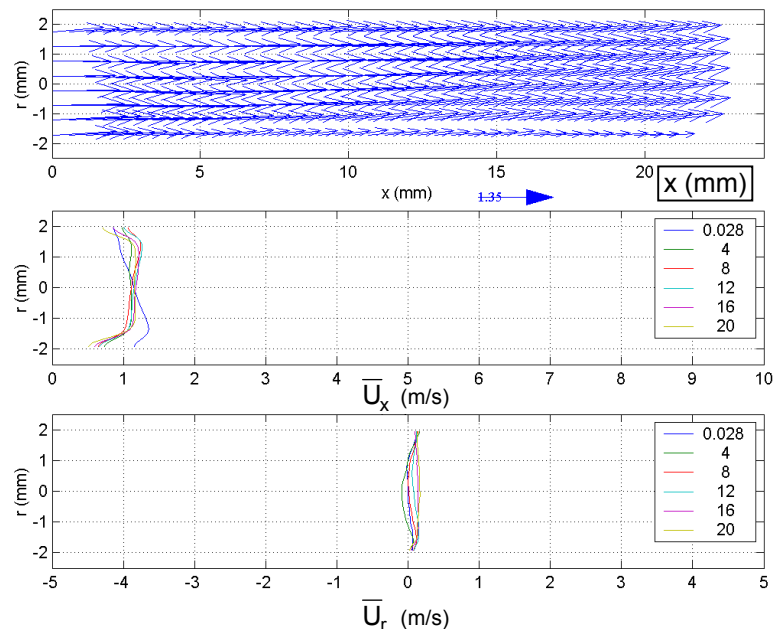


Fig. 10 Champ de vitesse moyen (1 vecteur sur 20), évolutions radiales de la vitesse axiale et de la vitesse radiale pour 6 positions axiales, dans le tube numéro 3 pour un débit d'entrée de $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

On présente successivement les vitesses sous forme de flèches dans le plan de mesures, puis les évolutions radiales de la vitesse axiale et radiale pour six positions le long du tube considéré. Pour des raisons de clarté, et compte tenu de la densité des champs obtenus par la méthode du flot optique, seul un vecteur vitesse sur 20 est ici représenté. La comparaison entre les évolutions à l'intérieur du tube numéro 2 (figure 9) et numéro 3 (figure 10) met en évidence

l'inhomogénéité des débits à l'intérieur de l'échangeur et le caractère non établi des écoulements, avec un fort gradient de vitesse selon la direction radiale.

4.2 Distribution de vitesses entre les tubes

La distribution des vitesses débitantes U_q mesurées par PIV à l'intérieur de chacun des tubes est présentée sur la figure 11, pour les cinq débits d'entrée étudiés entre 3 et 15 l.min⁻¹. On observe une forte disparité des débits dans chacun des tubes, avec un rapport, entre le tube traversé par le plus fort débit et le tube traversé par le débit le plus faible, pouvant atteindre 5. On remarque également que la forme de la distribution entre les tubes est indépendante du débit d'entrée. La vitesse débitante la plus forte est toujours située au niveau du tube numéro 2, qui est placé en face de l'entrée du collecteur d'entrée, un second maximum local est présent au niveau du tube numéro 5 qui est placé au niveau de la sortie du collecteur de sortie.

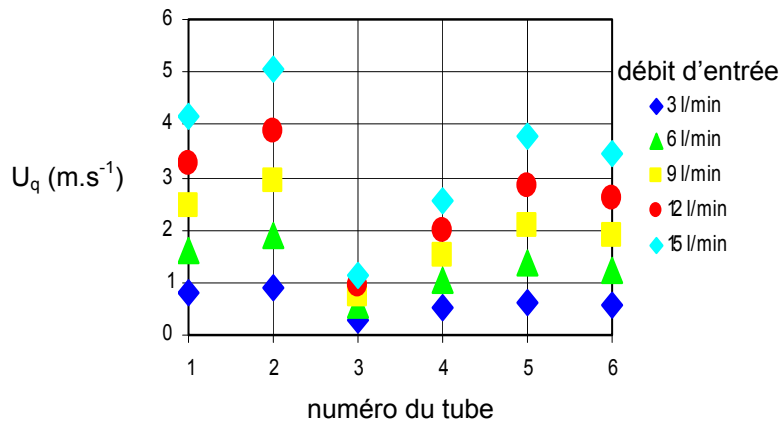


Fig. 11 Évolution de la vitesse débitante U_q dans les tubes de l'échangeur en fonction du débit d'entrée

4.3 Champ turbulent

Les acquisitions permettent également le calcul des variances des fluctuations de vitesses. Le nombre de Reynolds correspond bien à un écoulement turbulent, mais il est suffisamment faible pour que la convergence des moments d'ordre deux soit atteinte ; nous avons pu ainsi vérifier que celle-ci est réalisée pour la moyenne de 300 champs de fluctuations instantanées. Les figures 12 à 14 présentent les trois composantes du tenseur de Reynolds accessibles pour un débit de 12 l.min⁻¹ dans les tubes 1 à 6. L'évolution dans le tube 2, traversé par le débit maximum, met en évidence, dans la zone initiale où l'écoulement n'est pas établi, de forts niveaux de turbulence au centre du tube, qui tendent à s'atténuer vers la sortie. Dans le tube 3, où le débit est minimum, cette turbulence est beaucoup moins forte.

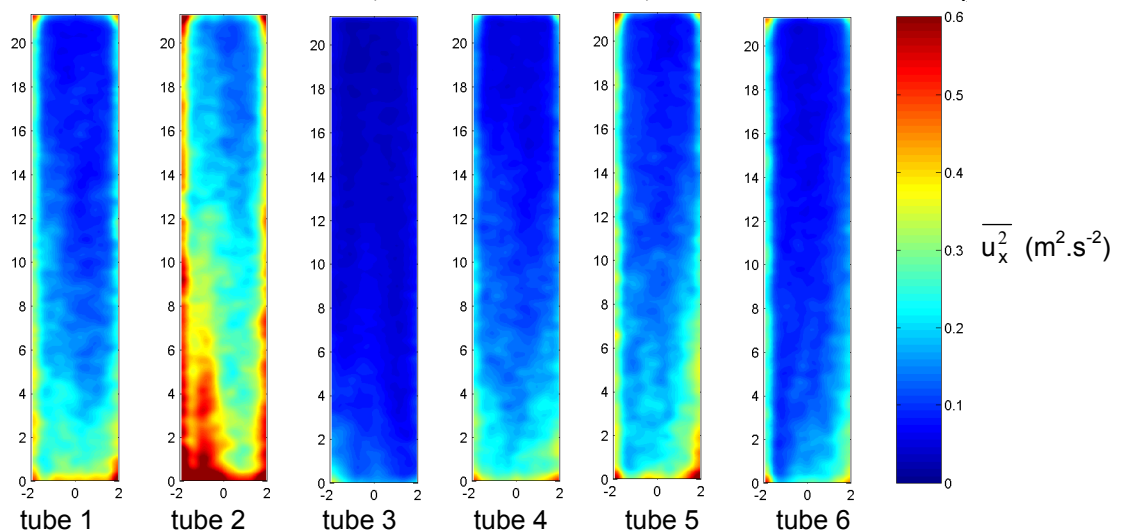


Fig. 12 Variance des fluctuations de vitesse axiale pour le débit d'entrée de 12 l.min⁻¹

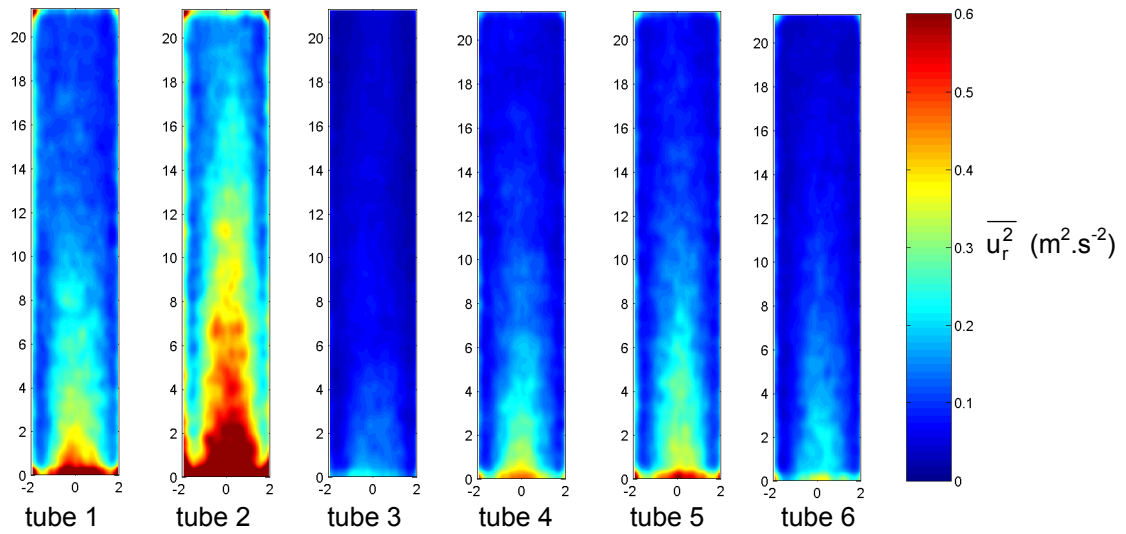


Fig. 13 Variance des fluctuations de vitesse radiale pour le débit d'entrée de 12 l.min⁻¹

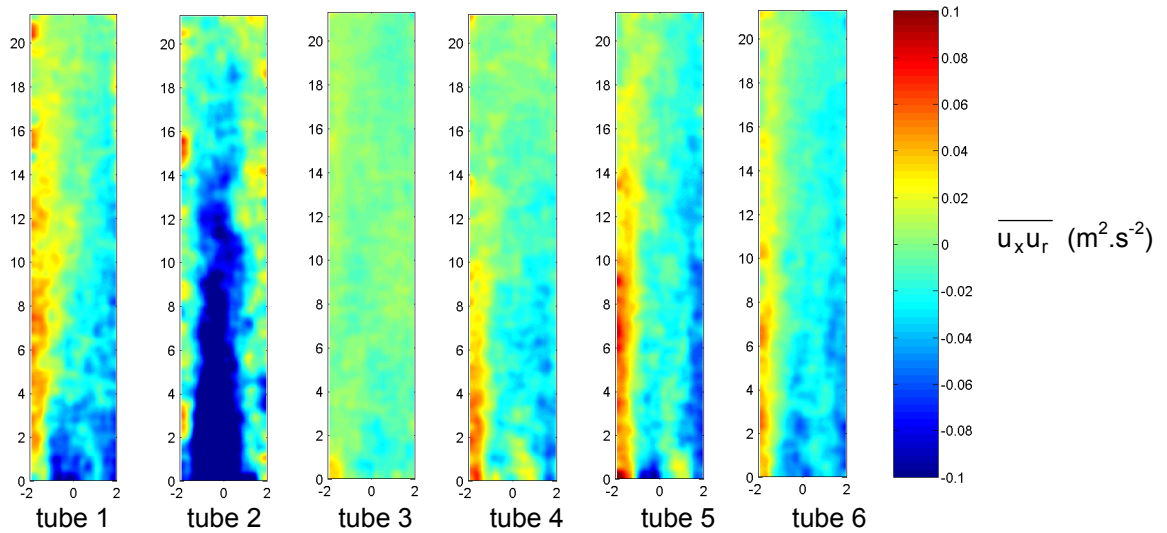


Fig. 14 Covariance des fluctuations de vitesse axiale et radiale pour le débit d'entrée de 12 l.min⁻¹

5. Conclusion

Une méthode relativement simple de filtrage des images, par rapport aux méthodes d'érosion ou de moyenne, a permis d'éliminer tout le bruit optique provenant des réflexions parasites. Les faibles diamètres des conduites ont pu être résolus finement en espace par l'utilisation du traitement par flot optique et programmation dynamique, ce qui fournit une forte densité d'information avec un vecteur vitesse calculé par pixel d'image. Une correction du chemin optique des faisceaux lumineux permet de ne pas utiliser de cuve à eau autour des tubes cylindriques. Les champs obtenus mettent en évidence que la géométrie de l'échangeur de chaleur, qui présente une entrée et une sortie qui ne sont pas situées dans le plan des tubes parallèles, entraîne un écoulement fortement tridimensionnel qui n'est établi dans aucun des tubes. Ceci a pour conséquence que les débits varient fortement entre les conduites, avec un rapport pouvant atteindre 5 entre les tubes numéro 2 et 3. Par ailleurs, on peut également obtenir les trois composantes du tenseur de Reynolds mesurées, qui montrent des niveaux de turbulence croissants avec la vitesse débitante et le caractère non établi de l'écoulement.

Référence

- [1] Quénot G.M., Pakleza J., Kowalewski T.A. Particle Image Velocimetry with optical flow, *Experiments in Fluids*, 25 : 177-189, 1998.